

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

РОМАНЮК Борис Миколайович

УДК 621.383:621.315.592.

ПРОЦЕСИ ІОННО-СТИМУЛЬОВАНОГО МАСОПЕРЕНОСУ  
І ГЕТЕРУВАННЯ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛАНАРНИХ  
СТРУКТУРАХ

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників  
та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1992

Робота виконана в Інституті напівпровідників АН України м.Київ

Науковий консультант член-кореспондент АН України

професор В.Г.ЛИТОВЧЕНКО

Офіційні опоненти: член-кореспондент АН України, доктор

фізико-математичних наук, професор

Ю.Г.ПТУШИНСЬКИЙ

доктор фізико-математичних наук, професор

П.І.БАРАНСЬКИЙ

доктор фізико-математичних наук, професор

В.Н.МОРДКОВИЧ

Ведуча організація: Київський Університет ім.Т.Г.Шевченка,

м.Київ

Захист відбудеться "25" листопада 1992 р. в 14 год. дв.  
на засіданні Спеціалізованої ради Д 01.16.25.01 при Інституті  
напівпровідників АН України /265650, ГСП, м.Київ-28, пр.Науки, 45/

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту  
напівпровідників АНУ

Автореферат розісланий "25" листопада 1992 р.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН УДР

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00691453 (S)

Вчений секретар  
Спеціалізованої ради,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор

В.Іценко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прогрес в розвитку сучасної мікроелектроніки залежить від успішних досліджень фізичних процесів в тонких напівпровідникових шарах і багатофазних шаруватих структурах типу діелектрик-напівпровідник (ДН), метал-діелектрик - напівпровідник (МДН) та ін. Ведеться постійний пошук нових фізичних ефектів, які можуть стати базою для створення якісно нових принципів побудови мікроелектронних систем. Активно розвиваються роботи в області матеріалознавства напівпровідникових кристалів, тонких плівок та багатофазних шаруватих структур. В першу чергу - це вивчення динаміки формування різного типу структурних дефектів, стану домішкових фаз, взаємодії цих компонентів твердого тіла та впливу їх на фізичні характеристики (електричні, оптичні, структурні) згаданих структур. Важливу роль відіграють точкові дефекти, які можуть вводитися мимовільно, або цілеспрямовано за допомогою спеціальних обробок і обумовлюють закономірності дифузії атомів, кінетику преципітації навіть в рівноважних технологічних умовах. Особливо специфічні умови та можливості з'являються в нерівноважних ситуаціях, які виникають при іонній імплантації, радіаційному опроміненні, високотемпературному гетеруванні та при рості-розпаду домішкових преципітатів та кластерів. Вивчення цих ефектів має важливе значення для поглибленого розуміння фізичних процесів в напівпровідникових структурах, базових для мікроелектроніки.

Як відомо, найбільш широке використання в твердотільній електроніці мають монокристали кремнію, тому їх детальному вивченню присвячена велика кількість робіт. При цьому слід врахувати, що ситуація з домішково-дефектними комплексами в кремнії суттєво змінюється на протязі технологічного процесу. Для стабілізації властивостей матеріалу та програмного управління ними останнім часом розвивається гетерування домішок і дефектів. Це включає вивчення таких фундаментальних питань, як дифузія, преципітація, утворення комплексів дефектів і їх переміщення в кристалі. І в цій галузі нові можливості дають методи нерівноважного гетерування, особливо в планарних структурах. Об'єднання процесу гетерування з створенням тонких епітаксійних, або діелектричних шарів дає змогу отримати якісно нову ситуацію для управління ростом плівок і їх параметрами. З цієї причини

актуальним є створення умов для інжекції точкових дефектів певного типу і використання їх для формування нових властивостей кристалів. Як метод для створення нерівноважної ситуації в кристалах було обрано іонну імплантацію, яка дозволяє в широкому діапазоні міняти концентрацію дефектів і домішок. При цьому слід врахувати, що механізми іонно-стимульованих реакцій при утворенні різного типу домішково-дефектних комплексів залишаються невиясненими. Важливим науковим і практичним завданням є вивчення механізмів та розробка технології створення прихованих діелектричних шарів в кремнії шляхом високоенергетичної імплантації іонів кисню, азоту і вуглецю. Вивчення цього кола явищ зв'язано з розробкою адекватних математичних моделей, які б дозволили міняти цілий ряд параметрів (коефіцієнти дифузії, швидкість реакції, механічні напруження та ін.) і визначити оптимальні умови експериментів.

На початку цієї роботи дослідження механізмів іонно-стимульованого упорядкування кристалічних ґраток, процесів росту епітаксійних плівок при нерівноважній концентрації точкових дефектів, впливу механічних напружень на масоперенос в планарних структурах були проведені слабо. Також були відсутні систематичні дослідження процесів гетерування і механізмів створення прихованих діелектричних шарів.

Отримані в роботі результати дозволили виявити ряд фізичних ефектів в імплантованих планарних структурах, встановити їх природу та запропонувати нову модель іонно-стимульованого упорядкування, знайти нові підходи до вивчення процесів іонно-стимульованого гетерування в планарних структурах, розробити технологічні процеси, що і визначає актуальність роботи.

Метою цієї роботи була розробка наукових основ нерівноважних процесів створення планарних напівпровідникових структур (типу ДН, МДН та ін.) на базі дослідження точкових дефектів, які вводяться за допомогою іонної імплантації, процесів масопереносу, росту-розпаду мікропреципітатів в монокристалах кремнію та багатокомпонентних шаруватих структурах.

Виршення поставлених завдань включало розробку таких питань:

— дослідження поведінки кристалу при дії на нього великих потоків точкових структурних дефектів, утворення

дефектно-домішкових комплексів, процесів розпаду ґратки з одного боку та стимульованого упорядкування з другого;

- вивчення механізмів дифузії та дрейфу власних атомів під дією механічних напружень та впливу нерівноважних точкових дефектів на формування кристалу при епітаксії в умовах дії фактору гетерування (так звана гетерна епітаксія);

- дослідження взаємодії потоків нерівноважних точкових дефектів з домішковими атомами різного типу; особлива увага приділялась поведінці домішок кисню і вуглецю при їх імплантації в кремній;

- розробка фізичних моделей формування шаруватих фаз захованих всередині матриці монокристалу кремнію, теоретичні розрахунки кінетики цих процесів та експериментальні дослідження структур кремній на захованому діелектрику (КНД). На основі цих моделей була виконана розробка технологічних процесів планарного гетерування в шаруватих структурах та створення прихованих діелектричних шарів.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні і узагальненні нових наукових результатів, які стосуються механізмів іонно-стимульованого упорядкування, планарного гетерування в шаруватих структурах при наявності нерівноважної концентрації точкових дефектів та моделювання і створення прихованих діелектричних шарів в монокристалах кремнію. Таким чином в даній роботі проведено рішення комплексної науково-технічної проблеми, а саме, розробка наукових основ створення іонно-стимульованих методів формування напівпровідникових шаруватих систем, що характеризуються досконалістю структури і заданими параметрами.

На захист виносяться такі положення:

1. Результати дослідження процесів аморфізації і упорядкування кристалічної ґратки кремнію при імплантації великих доз іонів різного типу; залежність цих процесів від вихідного стану матриці, концентрації легуючих домішок, їх типу і умов імплантації; роль механічних напружень у процесах аморфізації-упорядкування, що виникає при великих дозах і його осциляційний характер; модель фазово-структурних перетворень, яка базується на введенні перколяційного кластера і дозволяє пояснити отримані експериментальні результати.

2. Особливості епітаксіального росту плівки кремнію при наявності нерівноважної ситуації по точковим дефектам, яка

створюється шляхом формування гетерних ділянок за допомогою імплантації іонів  $Ag^+$ ; залежність ефективності гетерування від типів дефектів в гетерних областях та величини механічних напружень, які задаються режимами імплантації; розробка нового методу епітаксії – гетерної епітаксії, при якому ріст кристалічної плівки відбувається в умовах інтенсивного видалення дефектів та шкідливих домішок.

3. Нові механізми планарного гетерування в структурах  $Si-SiO_2$  з участю точкових дефектів; аномальний ефект гетерування вздовж границі поділу  $Si-SiO_2$ . Теоретичні модельні розрахунки параметрів гетерування в шаруватих структурах.

4. Ефект лазерно-стимульованої дифузії атомів кисню, імплантованих в кремній; результати дослідження орієнтаційних залежностей зворотнього розсіювання  $\alpha$ -частинок і отримані з них параметри зв'язків міжвузлових атомів кисню в кремнії.

5. Механізми прискорення генерації термодонорів при імплантації іонів вуглецю в  $Si$ ; аналіз розподілу механічних напружень в імплантованих структурах, який визначається координатною залежністю концентрації дефектів та їх взаємодією з дефектами на границі розділу  $Si-SiO_2$ .

6. Математичне моделювання кінетики росту прихованих діелектричних шарів в кремнії; кінетики перерозподілу імплантованих домішок та їх залежності від умов відпаалу та наявності центрів зародження нової фази.

7. Виявлення закономірностей процесів кристалізації  $Si_3N_4$  при формуванні структур з прихованим шаром, та механізми формування діелектричних шарів при комбінованій імплантації домішок кисню, азоту і вуглецю.

Пріоритетність результатів. Основні результати, по яким сформульовані наукові положення, отримані вперше.

Пріоритет підтверджується авторськими свідоцтвами на винаходи.

Практична цінність роботи полягає в тому, що в результаті виконання комплексних досліджень процесів динамічного планарного гетерування в шаруватих структурах на основі кремнію були встановлені основні закономірності епітаксійного росту кремнієвих плівок в умовах гетерування і дії механічних напружень та розроблена технологія гетерування, яка була впроваджена в серійне виробництво інтегральних схем і дозволила

суттєво знизити дефектність пливок і підвищити експлуатаційні параметри схем. Досліджено ефект лазерно-стимульованої дифузії, який дозволяє створювати профільовані структури при низьких температурах. Створено комп'ютерну програму для моделювання процесів росту прихованих діелектричних шарів в кристалах кремнію та розроблено технологічні основи формування діелектричних шарів при комбінованій імплантації кисню, азоту і вуглецю. Запропоновано технологію низькотемпературного формування р-п-переходів, яка базується на використанні знайденого ефекту стимулюючого впливу вуглецю на створення термодонорних центрів.

Основні методики досліджень. Специфіка поставленого завдання вимагала використання широкого кола експериментальних методів. Серед них:

- методи оптичної, растрової та трансмісійної електронної мікроскопії;

- рентгенівська дифрактометрія та топографія в двох-, трьох кристальній схемі;

- оптичні методи електровидбиття та комбінаційного розсіювання світла;

- аналіз профілів розподілу домішок за допомогою Оже-спектроскопії;

- дослідження вольт-фарадних та вольт-амперних характеристик;

- резонансне зворотнє розсіювання  $\alpha$ -частинок, в тому числі в режимі каналювання;

Апробація роботи. Основні результати, викладені в дисертації, опубліковані в 56 роботах та доповідах на 27-ми міжнародних, всесоюзних та республіканських конференціях: 26, 32 і 35-му Міжнародному колоквиумі по фізиці твердого тіла (м. Ільменау, Німеччина, 1981, 1987, 1989 рр.), Всесоюзній конференції по фізиці тонких пливок (Івано-Франківськ, 1984 р.), Міжнародній конференції по іонній імплантації в напівпровідники (Будапешт, 1985 р.), Всесоюзних семінарах по моделюванню на ЕОМ кінетики дефектів в кристалах (Ленінград, 1986, 1988 рр.), 1, 2, 3-х Всесоюзних конференціях по іонно-пучковій модифікації матеріалів (Чорноголовка, 1987 р., Каунас, 1989 р., Новосибірськ, 1991 р.), Республіканських конференціях по МДН-електроніці (Дрогобич, 1987 р., Севастополь, 1990 р.), 2, 3-й Міжнародних конференціях по гетеруванню дефектів (Німеччина, 1987, 1989 рр.). Всесоюзній конференції по електронним процесам на поверхні

(Новосибірськ, 1988р.), 4-й Всесоюзній конференції по спектроскопії комбінаційного розсіяння (Красноярськ, 1988 р.), Міжнародних конференціях по іонній модифікації твердих тіл (Люблін, 1988 р., Єленіте, 1990 р.), Всесоюзній конференції по фізиці поверхні (Київ, 1990 р.), Міжнародних конференціях по росту епітаксіальних плівок (Угорщина, 1990, 1991 рр.), Міжнародній конференції "Мікроелектроніка-90" (Мінськ, 1990 р.), Міжнародній конференції по іонно-пучковому аналізу твердих тіл (Євандховен, 1991 р.), Міжнародній конференції по фізиці тонких плівок (Франція, 1992 р.).

Особистий внесок автора. Всі експерименти і теоретичні розрахунки були виконані під керівництвом і при безпосередній участі автора.

Дослідження планарного гетерування в епітаксіальних структурах проводилися спільно з ВО "Гамма" (м.Запоріжжя). Співробітниками вказаного об'єднання під керівництвом автора проводили розробки інтегральних схем, в яких використовувалися результати експериментальних та теоретичних досліджень автора. Авторські свідоцтва на ці розробки отримані в співавторстві з співробітниками заводу.

В розділі 1 частково були використані результати робіт по дослідженню іонно-імплантованих структур методом комбінаційного розсіяння, виконаних під керівництвом автора разом з співробітниками лабораторії оптики ІН АНУ і опублікованих в співавторстві з ними.

Комплексні дослідження лазерно-стимульованої дифузії кисню виконувались разом з співробітниками Інституту ядерних досліджень АН України та Фізичного інституту АН Росії (м. Москва), які проводили опромінення зразків та вимірювання спектрів резонансного розсіяння. Постановка експериментів була виконана на зразках, підготовлених автором, під його керівництвом, і результати опубліковані в спільних роботах.

Загальна постановка і обґрунтування завдань досліджень, всі висновки окремих розділів, а також основні положення, які виносяться на захист, належать безпосередньо автору даної роботи.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків та додатку. Вона містить 375 сторінок, в тому числі 102 ілюстрації, 15 таблиць і список літератури із 301 назви.

## Короткий зміст роботи

В вступі приведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми, сформульована мета і викладено основні результати і положення, які виносяться на захист.

В першому розділі дається короткий огляд робіт по дослідженню процесів створення дефектів в напівпровідниках після імплантації різних іонів, та іонно-стимульованого упорядкування при повторній імплантації легких іонів. Проведено аналіз модельних уявлень та механізмів, які обговорюються в літературі.

Оригінальні результати були отримані при дослідженні кремнієвих структур методами оптичної спектроскопії: електровідбиття та комбінаційного розсіювання світла.

Із спектрів електровідбиття світла, що вимірювались в області локалізації зона-зонних переходів  $E_1$ ,  $E_0$  (~3,41 eV) визначались дефектність поверхневого шару (по зміні параметру уширення спектру  $\Gamma$ ) і величина механічних напружень (по зсуву енергії критичної точки) використовуючи вираз:

$$\frac{\partial E}{\partial p} = 5.1 \cdot 10^{-14} \text{ eV/\AA}$$

Були виконані дослідження кремнієвих структур, імплантованих іонами  $P^+$  після лазерного відпалу, які показали, що в процесі відпалу вносяться додаткові дефекти в поверхневий шар. Визначена мінімальна енергія для лазерного відпалу, яка дорівнює  $\geq 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>. Збільшення енергії дозволяє отримувати більш досконалі поверхневі шари з мінімальними механічними напруженнями ( $E_1 \sim 3.4$  eV). Порушення структури поверхневого шару низькоенергетичним іонним бомбардуванням приводить до гетерування дефектів в процесі лазерного відпалу і, в комбінації з низькотемпературним відпалом, дозволяє отримувати структурно досконалі поверхневі шари при достатньо низьких температурах.

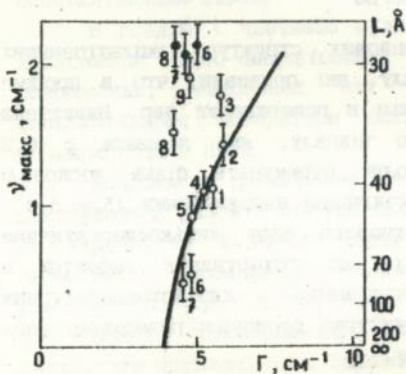
Дослідження процесів аморфізації кристалічної структури методом комбінаційного розсіювання світла показали, що збільшення дози імплантації іонів  $Ag^+$  до величин  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> приводить до уширення смуги розсіювання на оптичному фоні центру зони Бріллуєна ( $\nu = 521.5$  см<sup>-1</sup>), зсуву смуги в низькочастотну область і появи смуги розсіювання на фонах з довільним хвильовим вектором (смуга аморфної фази). Величина механічних напружень зв'язана з

величиною зсуву смуги розсіювання  $\Delta\nu$  виразом

$$\Delta\nu = \frac{G}{2\nu_0 B} \sigma$$

де  $\nu_0$  - вихідна частота фонона,  $B=2.29 \cdot 10^{14}$  Н/м<sup>2</sup>,  $G=-1.89 \cdot 10^{20}$  с<sup>-1</sup>,  $\sigma$  - величина напружень, яка дорівнює  $\sim 4$  кбар при дозі іонів  $\text{Ag}^+ \sim 1.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

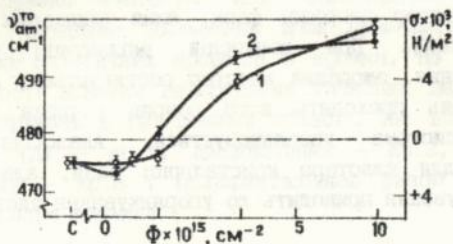
Вимірювання спектрів КР при тестуванні імплантованої структури світлом з різною довжиною хвилі показали, що розподіл механічних напружень по глибині має неоднорідний характер. При збільшенні дози  $\text{Ag}^+ > 7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> було знайдено ефект упорядкування структури на зразках п-типу Si, так що при дозі  $\sim 2.1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> смуга аморфної фази зникала. Зроблено аналіз процесів аморфізації - упорядкування на основі моделі просторової кореляції фононів, яка використовується для врахування розмірних ефектів в спектрах КР. Модель базується на поняттях про просторову локалізацію хвильової функції фононів в області, де зберігається упорядкована структура. При цьому вводиться функція, яка модулює хвильову функцію ідеального кристалу. Сумарні результати подано на мал.1, де наведено теоретичну залежність, з якої видно, що



Мал.1. Зв'язок  $\Gamma$ ,  $\nu_{\text{max}}$  і довжини кореляції  $L$ . Доза імплантації:  $D \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; 1- 0.62, 2- 1.86, 3- 4.65, 4- 6.2; 5- 10.8, 6- 12.4, 7- 15.5, 8- 21.7, 9- 27.9.

уширення смуги КР може бути обумовлено зменшенням розміру мікрокристалітів. Експериментальні результати, зображені точками для різних доз імплантації, свідчать про те, що з ростом аморфізації ефективний розмір мікрокристалітів зменшується, тоді як при упорядкуванні величина  $L$  росте. Діапазон чутливості методу КР по розміру мікрокристалів  $3.0 \pm 30.0$  нм. Відхилення

експериментальних точок від теоретичної кривої свідчить про наявність механічних напружень.



Мал.2. Залежність  $\nu_{\alpha}^{\text{TOT}}$  і напруження  $\sigma$  від дози імплантації  $\text{H}^+$  для енергії 75 кеВ [1] і 150 кеВ [2].

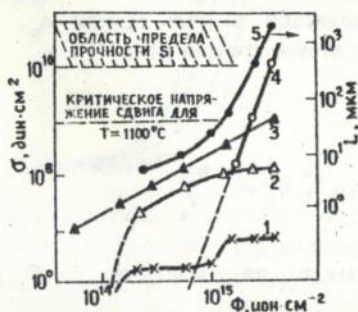
Були виконані дослиди по вивченню іонно-стимульованого упорядкування Si при імплантації іонів  $\text{H}^+$  і  $\text{He}^+$  в попередньо-аморфізовані структури. Знайдено ефект упорядкування, який залежить від концентрації легуючої домішки і значно ефективніше спостерігається на зразках p-типу провідності. Упорядкування системи супроводжується зміною механічних напружень в аморфній фазі, що проілюстровано на мал.2. Величина механічних напружень в аморфній фазі визначається із виразу  $\Delta\nu/\Delta\sigma = (2.5 \pm 0.3) \cdot 10^9 \text{ см}^{-1} \cdot \text{м}^2/\text{Н}$ . З дозової залежності механічних напружень видно, що при малих дозах іонів  $\text{H}^+$  спостерігаються напруження розтягування, а при упорядкуванні структури збільшуються напруження стискування до величини  $\sim 7.8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ . Аналогічні результати отримано із спектрів електровідбиття, які дають інформацію про структуру поверхневої області ( $\sim 10.0 \text{ нм}$ ). Імплантація іонів  $\text{H}^+$  і  $\text{He}^+$  в діапазоні доз  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$  приводить до відновлення структури тонкого поверхневого шару (параметр  $\Gamma$  зменшується до значень, характерних для вихідного монокристалу кремнію) і має місце релаксація механічних напружень. Точкові дефекти, які генеруються іонами  $\text{H}^+$  за областю розупорядкування не можуть мігрувати на поверхню, бо на їх шляху залягає аморфізований шар з пастками для мігруючих дефектів. Це являється аргументом, який підтверджує важливу роль механічних напружень в процесі іонно-стимульованого упорядкування. Виходячи з приведених

результатів, було запропоновано нову модель процесу аморфізації-упорядкування, в якій використовуються поняття фрактального кластера аморфної та кристалічної фази. Збільшення ступеня аморфізації приводить до збільшення розмірності кластера (виникає перколяційний кластер аморфної фази, який відповідає перекриттю аморфних областей). При повторній імплантації збільшуються механічні напруження, аморфний кластер ростягується, і при певній величині напружень проходить його розрив і різка зміна знаку напружень - система упорядковується. Аналогічна ситуація спостерігається для кластера кристалічної фази, але при цьому напруження стискування приводить до упорядкування системи.

Другий розділ присвячений дослідженням процесів гетерування при вирощуванні епітаксійних кремнієвих плівок. В першій частині розділу дається огляд робіт по гетеруванню, проводиться аналіз основних механізмів і методів, які використовуються в сучасній технології, а також обґрунтовується роль нерівноважних точкових дефектів в процесах гетерування.

Було вивчено механізми утворення дефектів при епітаксійному рості плівок на підкладках з локальними імплантованими ділянками. Проводилася імплантація іонів  $Ag^+$  через спеціально сформовану маску. Густина і тип дефектів в імплантованих областях залежать від дози імплантації. При дозі  $< 10^{14}$   $см^{-2}$  в імплантованих ділянках спостерігаються кластери точкових дефектів. Збільшення дози приводить до виникнення дефектів упаковки (ДУ) в площинах (111), густина яких залежить від дози в інтервалі  $10^{14} + 4 \cdot 10^{14}$   $см^{-2}$ . Подальше збільшення дози імплантації до порогу аморфізації кремнію приводить до виникнення дислокаційних петель, які ефективно поглинають точкові дефекти і концентрація ДУ та кластерів (ТД) зменшується в інтервалі доз  $5 \cdot 10^{14} + 10^{15}$   $см^{-2}$ . Далі, в імплантованих ділянках виникають двійники і полікристалічна фаза. Ефекти планарного гетерування (вздовж поверхні) в структурах з локальними гетерними областями спостерігаються починаючи з дози  $4 \cdot 10^{14}$   $см^{-2}$ . Дальнодія гетерування залежить від структури гетерної області і досягає  $\sim 1$  мм при дозах  $10^{15}$   $см^{-2}$ . Найбільшу гетеруючу ефективність мають дислокації  $1/2 \langle 110 \rangle$  та міжзернні границі. Важливим для забезпечення гетерування є формування механічних напружень, як в латеральному, так і в поперечному напрямках. Механічні

напруження досліджувались нами за допомогою методів електровідбиття та КР. Величина напружень залежить від дози імплантації і відстані від імплантованої області. Максимальні значення напружень  $\sigma = 6.5 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> спостерігаються при дозах  $1.2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Подальше збільшення дози приводить до релаксації напружень в-за пластичних процесів в кремнії. На мал.3 наведено дозові залежності довжини гетерування точкових дефектів (кр.5) і механічних напружень в гетерованій області, які визвані дефектами певного типу (ДУ - кр.1, дислокаціями - кр.2, імплантованими атомами аргону - кр.3 і полікристалічною фазою - кр.4). Слід відмітити кореляцію довжини



Мал.3. Залежність напружень в епітаксійних плівках Si від дози імплантації  $\text{Ag}^+$ , обумовлених ДУ (1), дислокаціями (2), домішками (3), границями зерен (4); (5) - дозова залежність довжини гетерування.

гетерування і величини розподілені в гетерованій області напружень, що свідчить про важливість цього механізму при гетеруванні точкових дефектів. Були виконані дослідження ефективності гетерування швидкодифундуючих домішок при планарному гетеруванні епітаксійних плівок за допомогою вимірювання топограм струму, індукованого електронним пучком (ЕВІС). Доведено, що наявність планарних гетерних областей на підкладках для епітаксійного росту плівки змінює умови зародження та росту плівки за рахунок виникнення нерівноважної ситуації по точковим дефектам. Була розроблена модель епітаксійного росту в нерівноважних умовах, що дає змогу шляхом формування гетерних областей і оптимізації умов росту отримати бездефектні плівки з необхідними параметрами. На основі досліджень фізичних процесів в таких структурах була розроблена технологія гетерування: впроваджена в серійне виробництво інтегральних схем, в яких

гетерні області формуються імплантацією  $Ag^+$  в пасивні ділянки схеми перед епітаксійним ростом півки. Це дозволило підвищити процент виходу схем, покращити їх основні параметри і стійкість до зовнішнього впливу.

В третьому розділі приведено теоретичні розрахунки та експериментальні результати по вивченню процесів планарного гетерування в структурах  $Si-SiO_2$ . Модельні експерименти проводилися на структурах метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) в яких гетерна область формувалась за допомогою імплантації різних іонів на границю поділу  $SiO_2-Si$ , а дифузія гетерованих домішок йшла вздовж границі поділу. Розрахунок розподілу домішок в процесі гетерування був зроблений шляхом вирішення диференціальних рівнянь для перерозподілу атомів, які знаходяться в узлі ґратки  $A_s$ , в міжвузловому положенні  $A_t$  і міжвузлових атомів кремнію  $Si$ :

$$\frac{\partial N_{As}}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} [K^0 N_{Si} N_{As} - N_{At}]$$

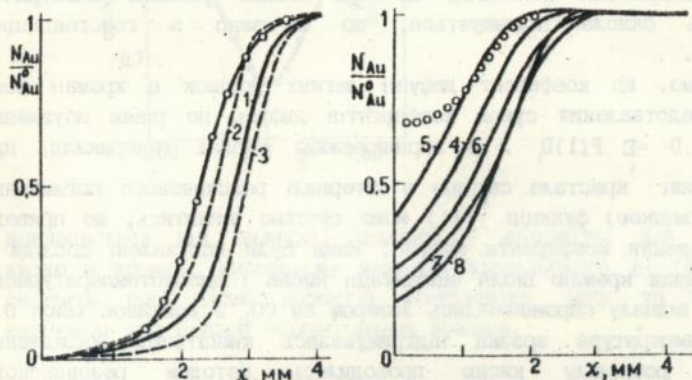
$$\frac{\partial N_{At}}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} [K^0 N_{Si} N_{As} - N_{At}] + \text{div}(D_{At} \vec{\nabla} N_{At}) - \frac{N_{At}}{\tau_i}$$

$$\frac{\partial N_{Si}}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} [K^0 N_{Si} N_{As} - N_{At}] + \text{div}(D_{Si} \vec{\nabla} N_{Si}) - \frac{1}{\tau_i} (N_{Si} - N_{Si}^0)$$

де постійна швидкості реакції  $K = N_{At} / (N_{As} \cdot N_{Si})$  виражається через рівноважні концентрації компонентів, які беруть участь в гетеруванні, а  $\tau$  - характерний час протікання квазіхімічних реакцій і  $\tau_i$  - час відновлення рівноваги.

Теоретичні розрахунки були співставлені з експериментами по вимірюванню розподілу генераційного часу  $\tau_g$  в МДН структурах вздовж поверхні при віддаленні від гетерної області. Було вперше знайдено ефект аномального гетерування вздовж границі поділу  $SiO_2-Si$ , спостерігалось суттєве збільшення  $\tau_g$  на відстані  $\sim 5$  мм від гетерної області. Імплантація іонів  $P^+$  і  $C^+$  виявила суттєву різницю в розподілі  $\tau_g(x)$ , що видно на мал.4, де приведено експериментальні точки і теоретичні графіки для різних умов гетерування. Гетеруючий відпал зразків після імплантації іонів  $P^+$  на границю поділу  $Si-SiO_2$  приводить до інжекції міжвузлових атомів кремнію з-за створення фази  $SiP$ , які взаємодіють з домішками, стимулюють розпад мікропримітивів і

прискорюють процес гетерування. При імплантації  $C^*$  інжектуються вакансії, і збільшення довжини гетерування не спостерігається, а профіль  $\tau_g(x)$  є характерним для дифузійного перерозподілу домішок без взаємодії між точковими дефектами. Експериментальні результати були отримані на модельних зразках після їх легування атомами золота.



Мал. 4. Розподіл гетерованих домішок вздовж границі поділу  $SiO_2-Si$ : кр. 1-8 - розрахунки при різних значеннях  $D, \tau$  і  $N_{Si1}$ ; точками нанесені експериментальні результати по розподілу  $\tau_g$  для імплантації  $P^*$  (а) і  $C^*$  (б).

Дослідження параметрів границі поділу  $Si-SiO_2$  показали, що інжекція точкових дефектів впливає на густину поверхневих станів і заряд, вбудований в діелектрик. Коефіцієнт дифузії домішок при гетеруванні вздовж границі поділу  $SiO_2-Si$  був визначений із співставлення експериментальних і теоретичних даних і дорівнював  $\sim 10^{-4} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  що значно більше об'ємних коефіцієнтів дифузії для атомів  $Au, Cu, Fe$  та ін. при даній температурі і свідчить про прискорену дифузію вздовж границі розділу  $SiO_2-Si$ .

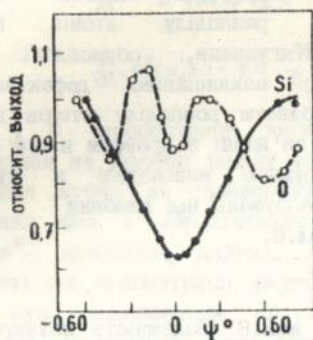
Четвертий розділ дисертації присвячений дослідженням поведінки атомів кисню при його імплантації в кремній, та взаємодії з точковими дефектами, які вводяться при імплантації. Як показали наші дослідження, ефективність взаємодії кисню з поверхнею при термічному та анодному окисленні залежить від введення дефектів в поверхневу область. Залежність кінетики

окислення від дози низькоенергетичної імплантації Si іонами Ar<sup>+</sup> має немонотонний характер. Вид залежності корелює з розрахунками енергетичної стійкості дефектних кластерів в моделі випадкових атомних скупчень. Таким чином, ми знайшли експериментальне підтвердження наявності метастабільних аморфних станів в Si. Дослідження процесів росту тонких окислів на підкладках після іонної імплантації показали, що при певних режимах електрична стійкість окисла підвищується, що зв'язано з гомогенізацією поверхні.

Відомо, що коефіцієнт дифузії легких домішок в кремнії може бути представлений сумою коефіцієнтів дифузії по рівню збурення атома  $D = \sum_i P(l)D_i$ . В нерівноважних умовах (наприклад, при опроміненні кристала світлом в інтервалі резонансного поглинання даною домішкою) функція  $P(l)$  може суттєво змінитись, що приведе до збільшення коефіцієнта дифузії. Нами були поставлені дослиди в яких зразки кремнію після імплантації кисню і низькотемпературного (550°C) відпалу опромінювались лазером на CO<sub>2</sub> з довжиною хвилі 9.2 мкм. Температура зразка підтримувалась кімнатною. Дослідження профілю розподілу кисню проводилось методом резонансного зворотного розсіювання  $\alpha$ -часток. Використовувався ізольований резонанс при енергії  $\alpha$ -часток 3.048 Мев. Роздільна здатність по глибині в наших дослидах була  $\leq 0.05$  мкм. Коефіцієнт дифузії кисню після вимірів профілів розподілу до і після опромінення визначався

із аналізу профілів з використанням формули  $\frac{C_i}{C_0} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 4Dt}}$ , де  $C_0$  і  $C_i$  - концентрації кисню в максимумі до і після дифузії,  $\sigma$  - дисперсія розподілу,  $t$  - час дифузії. Був знайдений ефект лазерно-стимульованої дифузії, з коефіцієнтом дифузії рівним рівноважному коефіцієнту при температурі  $\sim 900^\circ\text{C}$ . Слід відмітити, що дослиди велись на зразках з великою концентрацією імплантованого кисню, що дещо зменшувало ефект дифузії за рахунок преципітації при температурах відпалу радіаційних дефектів ( $\sim 550^\circ\text{C}$ ). Проводились дослиди впливу поляризації світла на ефект дифузії, які показали, що ефект більш виразний при умові  $E \parallel \langle 111 \rangle$ .

Орієнтаційні залежності виходу зворотно розсіяних  $\alpha$ -часток відносно осі  $\langle 100 \rangle$  монокристалу Si приведено на мал.5. Це дало змогу визначити величину кута зв'язків Si-O-Si, які відомі, як положення міжзв'язкового кисню. Отримана величина кута  $\sim 163^\circ$  дещо

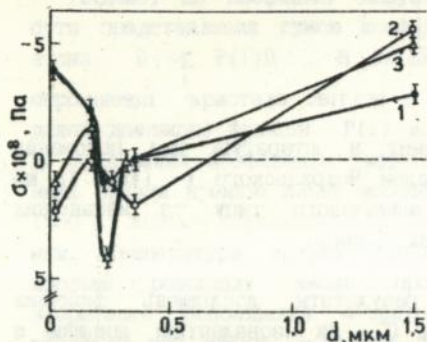


Мал.5. Кутові залежності  $\alpha$ -часток на атомах кремнію (1) і кисню (2).

відрізняється від величин, відомих в літературі для положення кисню в кремнії, вирощеному методом Чохральського ( $\sim 149.8^\circ$ ), що свідчить про вплив дефектів міжзловового типу та механічних напружень при відпалі імплантованих зразків.

П'ятий розділ містить результати досліджень фізичних процесів в Si після імплантації  $C^+$ , як ізовалентної домішки з малим ковалентним радіусом. Методом ЕПР було знайдено центри з  $g=2.0027$  в склад яких входить вуглець. Відпалі при  $T=923$  K на протязі 15-30 хвилин приводили до виникнення лінії з  $g=1.9992$ , що є характерним для термодонорів ТД-11. Концентрація їх залежить від дози імплантації і досягає значень  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при дозах  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Доследи показали, що імплантація вуглецю суттєво зменшує час створення ТД-11, що пов'язано з впливом вуглецю та вакансійних дефектів на швидкість створення комплексів  $Si_xO_y$ . Слід зазначити, що вуглець збільшує термостабільність ТД-11 при температурі їх відпалу  $\sim 1173^\circ\text{K}$ . Після високотемпературних відпалів зразків, імплантованих  $C^+$  виникає електронна провідність в поверхневому шарі кремнію. Величина провідності залежить від енергії та дози імплантації. Запропоновано модель цього ефекту, яка базується на механізмах прискорення приципitaції  $SiO_2$  в області імплантації. Вбудований в мікропрещипитати позитивний заряд приводить до виникнення індукованного n-шару. Наявність малих прещипитатів з розмірами  $\sim 5$  нм підтверджено електронно-мікроскопічними дослідями. За допомогою оптичних методів були досліджені розподіли дефектів

та механічних напружень після термічних відпалів структур імплантованих  $C^+$ . В області розподілу атомів вуглецю спостерігаються напруження розтягування, обумовлені малим ковалентним радіусом вуглецю і вакансіями дефектами. В поверхневому шарі, а також за областю розподілу атомів вуглецю виникають напруження стискування, зв'язані з дрейфом в цій області міжвузлових атомів а також пружною взаємодією з сусідніми областями. Залежність механічних напружень від глибини для різних зразків приведено на мал.6.



Мал.6. Залежність механічних напружень від глибини, отримані із спектрів ЕВ і КР: імплантований зразок (1), після низькотемпературного (2), та високотемпературного (3) відпалів.

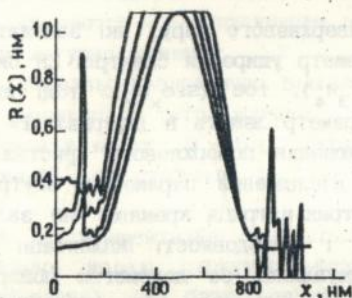
Ефективність відпалу поверхневих шарів після імплантації  $C^+$  залежить від інжекції точкових дефектів з границі поділу  $SiO_2-Si$ . Був знайдений ефект гетерування швидкодифундуючих домішок та кисню при імплантації  $C^+$  з різними енергіями. Особливо перспективним є використання високоенергетичної імплантації ( $\sim 9,5$  Мев), що дає змогу створити занурений гетерний шар в  $Si$  під активною областю. Розроблено технологічні основи для зменшення напружень та гетерування домішок в структурах кремнію з діелектричною ізоляцією (КСДІ).

В шостому розділі викладено результати математичного моделювання, створення та дослідження кінетики формування стехіометричних діелектричних фаз в матриці напівпровідника. Була створена комп'ютерна програма, яка дозволяє моделювати кінетику формування фази при різних параметрах. Для цього розраховувались профілі міжвузлового кисню та величини радіусів преципітатів  $SiO_2$  в залежності від тривалості відпалу. Кінетика зміни цих параметрів описувалась системою рівнянь:

$$\frac{dC}{dt} = D^*(x, t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + WC, C_p, R$$

$$\frac{d}{dt} R^2(x, t) = 2D \frac{C(x, t) - C_p(R)}{C_p - C_p(R)} \text{ пр}$$

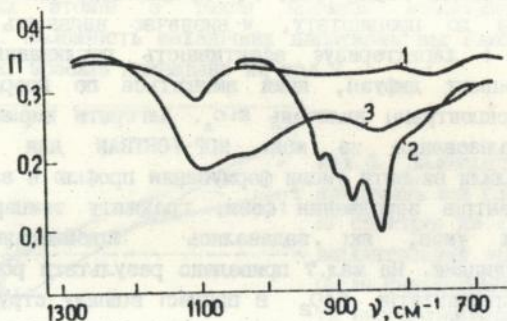
де  $C_p$  і  $C$  - концентрації кисню в  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}$ ,  $C_p$  - рівноважна концентрація на границі поділу фаз,  $p, r$  - коефіцієнти, які описують прилипання атома до преципітату,  $w$  - визначає наявність центрів зародження фаз і характеризує ефективність поглинання атомів кисню,  $D^*$  - коефіцієнт дифузії, який змінюється по координаті в залежності від концентрації включень  $\text{SiO}_2$ . Алгоритм вирішення цієї задачі був реалізований на мові NDP-FORTRAN для IBM-386. Розрахунки дозволили вивести умови формування профілю в залежності від наявності центрів зародження фази, градієнту температури а також граничних умов, які задавались відбиваючими, або поглинаючими границями. На мал.7 приведено результати розрахунків зміни радіусів преципітатів  $\text{SiO}_2$  в процесі відпаду структур при  $T = 1300^\circ\text{C}$ . Характерним є зародження і ріст мікропреципітатів в поверхневому шарі  $\text{Si}$ .



Мал.7. Залежність розподілу розмірів преципітатів  $\text{SiO}_2$  по глибині зразка в процесі відпаду при  $T=1300\text{ K}$

Для оптимального формування фази потрібно реалізувати швидкий вихід температури на режим, щоб подавити умови зародження мікропреципітатів  $\text{SiO}_2$ , вводити центри зародження фази, та в процесі відпаду змінювати граничні умови з поглинаючої границі на відбиваючу. Кінетика формування фази  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в  $\text{Si}$  була досліджена на структурах імплантованих іонами  $\text{O}^{2-}, \text{N}^+$  та  $\text{O}^+ + \text{N}^+$ . Якість поверхневого кристалічного шару досліджувалась за допомогою

спектри електровідбиття світла. Було показано, що відпалі структур з шаром  $Si_3N_4$  приводять до його кристалізації. На мал.8 приведено спектри інфрачервоного пропускання, з яких видно, що  $Si_3N_4$  кристалізується (кр.2) , а після відпалу структур з комбінованою імплантацією ( $O^+ - N^+$ ) ефект кристалізації не спостерігається (кр.3).



Мал.8. Спектри ІЧ-пропускання структур КНД: 1-вихідний зразок, 2- нітридна плівка, 3- оксинітридна плівка.

Були досліджені параметри поверхневого шару, які залежать від умов імплантації та відпалу. Параметр уширення спектрів ЕВ складає  $\Gamma=130$  (для  $SiO_2$ ),  $118$  (для  $Si_3N_4$ ),  $100$  ( $SiO_xN_y$ ), тоді як для вихідного зразка кремнію цей параметр лежить в інтервалі  $\Gamma=95 - 110$ . Крім того, після з травлювання поверхневого кристалічного шару кремнію, були проведені дослідження параметрів внутрішньої границі поділу прихований діелектрик-матриця кремнію, які залежать від умов імплантації (типу іонів і послідовності імплантації  $O^+, N^+$ ). Профілі кисню та азоту досліджувались за допомогою пошарового аналізу Оже-спектрів та поперечних зрізів в трансмісійному електронному мікроскопі. Ефективність створення фази збільшується при додатковій імплантації іонів  $C^+$ , а КНД-структура характеризується чітко вираженими шарами з певною специфікою. Відмічено роль вуглецю при формуванні оксинітридних плівок. В області розподілу  $C^+$  стимулюється зародження фази  $SiO_2$ , що приводить до формування оксинітридної фази на границях розділу  $Si-SiO_2$  і збільшення товщини діелектрика при достехіометричних дозах.

1. Розроблено фізичні основи формування шаруватих багатофазних структур з використанням такого фактору, як стимульований нерівноважний процес. Це методи гетерної епітаксії, стимульованого гетерування в структурах  $Si-SiO_2$ , створення прихованих діелектричних шарів, іонно-стимульоване упорядкування ґратки.

2. Виконано систематичні дослідження отриманих згаданими методами структур, що дало змогу виявити ряд нових явищ, пов'язаних із взаємодією іонних пучків із напівпровідниковою матрицею. Було встановлено, що:

- кінетика лазерно-термічного відпалу імплантованих структур залежить від умов на поверхні, яка проявляє себе як гетер при низькоенергетичній бомбардуванні іонами  $Ar^+$ ;

- при великих дозах імплантації іонами спостерігаються ефекти упорядкування, пов'язані із збільшенням розмірів мікрочастінок від 2.0 нм до 30.0 нм. Визначальну роль у фазових структурних перетвореннях відіграють механічні напруження;

- параметри іонно-пучкового відпалу залежать від концентрації та типу легуючої домішки;

- середньо-квадратичне відхилення кутів зв'язку  $\Delta\theta$  атомів Si від ідеальної тетраедричної конфігурації при аморфізації змінюється у межах  $8^\circ-15^\circ$ ; структури з  $\Delta\theta$ , меншими  $6.6^\circ$  або більшими  $15^\circ$ , не стабільні.

3. Експериментальні результати були інтерпретовані на основі розробленої моделі структурно-фазового переходу (аморфізація - упорядкування), яка базується на введенні перколяційного кластера аморфної фази, параметри якого змінюються під дією механічних напружень.

4. Проведено систематичне вивчення розробленого у даній роботі нового типу гетерування - планарного.

Встановлено, що:

- формування на поверхні кристалу локальних ділянок за допомогою імплантації іонів дозволяє керувати епітаксіальним ростом і поліпшувати структурну досконалість плівок;

- ефективність гетерування залежить від типу дефектів у гетерних областях. Дальнодіючий ефект гетерування обумовлений механічними напруженнями, величина яких залежить від дози і досягає  $\sim 6.5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ .

5. Знайдено ефект аномального (далекодючого  $\sim 4 \text{ нм}$ ) гетерування в структурах  $\text{Si-SiO}_2$  при імплантації іонів на границю розділу  $\text{Si-SiO}_2$ . Виконано теоретичні розрахунки і показано, що механізм гетерування залежить від інжекції точкових дефектів міжвузлового типу.

6. Запропоновано та обґрунтовано новий спосіб епітаксійного росту плівок при наявності локальних гетерних ділянок, які змінюють умови зародження та росту плівок.

7. Експериментально доведено існування метастабільних станів аморфного напівпровідника.

8. Виявлено лазерно-стимульовану дифузію кисню в  $\text{Si}$  при опроміненні світлом з довжиною хвилі у діапазоні резонансного поглинання ( $\lambda \sim 9 \text{ мкм}$ ). Визначено кут зв'язків  $\text{Si-O-Si}$  у кремнії, що дорівнює  $163^\circ$ .

9. Виконано цикл досліджень параметрів  $\text{Si}$  після імплантації іонів  $\text{C}^+$ . Знайдено ефект стимульованого впливу вуглецю на формування термодонорних центрів та мікропреципітатів  $\text{SiO}_2$ . Досліджено ефективність гетерування при високоенергетичній ( $9.5 \text{ MeV}$ ) імплантації  $\text{C}^+$ .

10. Вивчено процеси формування фаз стехіометричного складу в матриці напівпровідника при імплантації іонів  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$  з великою дозою. Розроблено методи математичного моделювання кінетики цих процесів і виконано розрахунки профілей розподілу преципітатів  $\text{SiO}_2$  при формуванні фази. Виявлено основні фактори, що впливають на якість структури КНД, а саме: концентрація центрів зародження фази  $\text{SiO}_2$ , швидкість виходу температури на режим та умови високотемпературного відіалу. Виявлено ефект кристалізації фази  $\text{Si}_3\text{N}_4$  та знайдено умови подавлення кристалізації шляхом комбінованої імплантації  $\text{O}^+$  і  $\text{N}^+$ .

11. Розроблено технологічні процеси планарного гетерування в шаруватих структурах, формування вбудованих гетерних областей та створення діелектричних фаз в матриці напівпровідника з використанням процесів іонного легування, які впроваджені у виробництво інтегральних схем, а також можуть бути використані для створення мікроелектронних структур нового покоління.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Горбань А.П., Литовченко В.Г., Романюк Б.Н. О влиянии поверхностных дефектов на характеристики МДП структур // Укр. физ. журнал. - 1978. - т.23, вып.10. - С.1744-1748.
2. Литовченко В.Г., Костылев В.П., Романюк Б.Н. О влиянии ионной бомбардировки на проводимость аморфных пленок // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. - 1979. - т.23, вып.29. - С.8-19.
3. Особенности лазерного отжига в ионно-имплантированных образцах кремния при различных условиях на поверхности / В.И.Гавриленко, В.Г.Литовченко, В.Г.Попов, Б.Н.Романюк // Полупр.техн. и микроэлектроника. - 1980. - вып.32. - С.22-29.
4. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н. Свойства полупроводникового материала, который используется для изготовления интегральных схем // Брошюра "Знание", К., - 1980. - 20 с.
5. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н. Эффект анизотропного геттерирования в планарных структурах // Физ. и техн. полупр. - 1983. - т.17, вып.1. - С.50-53.
6. Малкин А.А., Ржепецкий В.П., Романюк Б.Н. Экспериментальное исследование модели случайных атомных скопления в случае аморфного кремния // В кн. "Моделирование на ЭВМ радиационных дефектов в кристаллах". - Ленинград - 1983. - С.120-127.
7. Литовченко В.Г., Москаль Д.Н., Романюк Б.Н. Окисление разупорядоченной поверхности кремния // В кн. "Физика поверхностных явлений в полупроводниках". - К. "Наукова думка" - 1984. - С.31-32.
8. Романюк Б.Н., Ржепецкий В.П., Рудской И.В. Влияние поверхностных радиационных дефектов на процессы формирования окисного слоя в структурах ДП ( $Si-SiO_2$ ) // Оптоэлектроника и полупр. техн. - 1985. - вып.8. - С.34-40.

9. Ржепецкий В.П., Романюк Б.Н., Балабай Р.И. Особенности адгезии металла на аморфизированной поверхности полупроводников // Физ. и техн. полупроводников. - 1985. - т.19, вып.9. - С. 1701-1703
10. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н., Ржепецкий В.П. Особенности процесса взаимодействия кислорода с поверхностью кремния, возмущенной ионной плазмой // Укр. физ. журнал. - 1985. - т.30, вып.12. - С. 1849-1851.
11. А.с. NI281083 СССР. Способ получения автоэпитаксиальных слоев кремния / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, Р.И.Марченко и др. // Заявка N3905076/31-25. Приоритет 18.10.1984. - Выд. 01.09.1986г.
12. А.с. NI237001 СССР. Способ контроля дефектов поверхности полупроводниковых пластин / В.Г.Литовченко, В.Г.Попов, Б.Н.Романюк и др. // Заявка N3804040. Приоритет 18.10.1984. - Выд. 08.02.1986г.
13. А.с. NI245935 СССР. Способ упорядочения металлических сплавов / А.В.Желдубовский, А.Д.Погребняк, Б.Н.Романюк // Заявка N3778262. Приоритет 06.08.1986. - Выд. 22.04.1986г.
14. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н., Ровенских П.И. Расчеты методом Монте-Карло профиля распределения ионов в слоистой структуре Si-SiO<sub>2</sub> с переходным слоем // В кн. "Методы машинного расчета взаим. ионов с твердым телом". - М., - 1986. - С. 45-49.
15. Исследование кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми оксидными и нитридными изолирующими слоями / В.Г.Литовченко, В.Г.Попов, Б.Н.Романюк и др. // Оптоэлектроника и полупр. техн. - 1986. - вып.10. - С. 58-66.
16. А.с. NI349593 СССР. Способ изготовления структур Si-SiO<sub>2</sub> / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, В.Г.Попов и др. // Заявка N3935414. Приоритет 29.07.1985. - Выд. 01.07.1987.
17. Исследование процесса дефектообразования в имплантированных структурах при эпитаксиальном росте пленок / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, Р.И.Марченко и др. // Физ. и техн. полупроводн. - 1986. - т.20, вып.7. - С. 1174-1180.
18. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н., Шаповалов В.П. Эффект планарного геттерирования при эпитаксиальном наращивании пленок кремния // Оптоэлектроника и полупр. техн. - 1986. - вып.10. - С. 84-95.
19. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н., Гудской И.В. Механизмы формирования поверхностных дефектов // Оптоэлектроника и полупр. техн. - 1987. - вып.11. - С. 25-35.

20. Имплантационные методы формирования скрытого диэлектрического слоя / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, Р.И.Марченко и др. // Тезисы докладов I Всесоюзн.конф. по ионно-лучевой модификации материалов.- Черноголовка, 1987.- С. 105-106.
21. Кив А.Е., Романюк Б.Н., Литовченко В.Г. Перколяционные методы исследования начальных стадия разупорядочения п/п при ионной имплантации // Тезисы докладов I Всесоюзн. конф. по ионно-лучевой модификации материалов.-Черноголовка, 1987.-С.203-204
22. Влияние комбинированной имплантации  $Ag^+$  и  $H^+$  на спектры электроотражения кремния / В.И.Гавриленко, Н.И.Клюа, Б.Н.Романюк и др.// Тезисы докл.5 Респ.конф. по физ.проблемам МДП интегральной электроники.- Дрогобыч, 1987.-С.46-47.
23. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н. Физические принципы планарного геттерирования в эпитаксии // 32 Intern. Wiss. Koll. T.H.-Ilmenau, 1987.- P. 77-81.
24. Litovchenko W.G., Romanjuk B.N., Rudskoi I.W. Mechanisms of ion stimulated gettering in planar structures // Gettering and defect engineering in the semiconductor technology. - Garzau, DDR, 1987.- P.297-304.
25. А.с. NI389598 СССР.Способ изготовления многослойных структур/ Г.В.Копецкий, Ю.А.Устинов, Б.Н.Романюк и др.//Заявка N4077635. Приоритет 05.05.1986г.- Выд. 15.12.1987г.
- 26 Исследование процессов планарного геттерирования в структурах со скрытыми изолирующими слоями / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, В.Г.Попов // Оптоэлектроника и полупр. техн.- 1988.- вып.13.- С. 85-90.
27. Исследование процесса разупорядочения Si при ионной имплантации  $Ag^+$ / М.Я.Валах, М.П.Лисица, Б.Н.Романюк и др. // Физ. и техн. полупроводн.- 1988.- т.22, вып.11.- С.1961-1966.
28. Механизмы геттерной эпитаксии тонких полупроводниковых пленок / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, И.В.Рудской и др. // Препринт NI2 Ин-та физики АН Украины.- 1988.- 36 с.
29. Романюк Б.Н., Герсга А.Н., Вознюк Е.И. Перколяционная модель аморфной фазы в Si // В кн."Моделир. на ЭЭМ дефектов в кристаллах".- Ленинград.- 1988.- С. 173-175.
30. Исследование КРС для локального контроля упругих напряжений в ИС / В.В.Артамонов, М.Я.Валах, Б.Н.Романюк и др. // Тезисы докл. 4 Всесоюзн.конф. по спектроскопии. - Красноярск, 1982.- т.1.- С. 147-148.

31. Литовченко В.Г., Попов В.Г., Романюк Б.Н. Механизмы формирования встроенных слоев в кремниевых пластинах // Тезисы докл. 2 Всесоюзн. конф. по ионно-лучевой модификации материалов.- Каунас, 1989.- С. 139-140.
32. Litovchenko V.G., Klyui N.I., Romanyuk B.N. Investigation of ion implanted silicon by electroreflectance spectroscopy // Phys.Stat.Sol.(a).- 1989.- v.112, N2. - P. 805-809.
33. А.с. NI498317 СССР. Способ внутреннего геттерирования в кремниевых пластинах / В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк, В.Г.Попов и др.//Заявка N4304689. Приоритет 14.09.1987г.- Выд.1.04.1989г.
34. Анализ распределения упругих напряжения при планарном геттерировании кремниевых структур / В.В.Артамонов, М.Я.Валах Б.Н.Романюк и др.// Письма в Журнал техн.физ.- 1989.- т.15, вып.6.- С. 72-75.
35. А.с. NI547608 СССР. Способ изготовления микросхем / Д.И.Кропман, В.Г.Литовченко, Б.Н.Романюк и др.// Заявка N4463576. Приоритет 18.07.1988г. - Выд. 01.II.1989г.
36. Романюк Б.Н. Физические принципы структурного планарного геттерирования // Оптоэлектроника и полупр. техн.- 1989.- вып.16.- С. 37-42.
37. Litovchenko V.G., Romanyuk B.N. The properties of the defects in heavy implanted Si // Gettering and defect engineering in the semiconductor technology. - Garzau, DDR, 1989.-P. 75-85.
38. Резонансная лазерно-стимулированная диффузия кислорода в кремнии / А.Н.Арцимович, В.Н.Павлович, Б.Н.Романюк и др. // Препринт ФИАН.- 1989, NI64.- 38 с.
39. Silicon near surface self-annealing under high dose Ar<sup>+</sup> ion implantation / V.V.Artamonov, M.Ya.Valakh, B.N.Romanyuk et al.// 3-rd Intern. Conf. "Energy pulse and particles".- Dresden , 1989.- P. 122-124.
40. Raman spectroscopic studies of planar gettering effects / V.V.Artamonov, M.Ya.Valakh, B.N.Romanyuk et.al.// Appl.Phys.- 1990.- v.A51.- P.264-267.
41. Романюк Б.Н., Клюй Н.И., Прокофьев А.Ю. Влияние имплантации С<sup>+</sup> на структурное совершенство поверхностных слоев Si // Тезисы докл. 6 Респ.конф."Физ. проблемы МДП-интегральной электроники".- Севастополь, 1990.- С. 90-91.
42. Особенности образования ТД-2 в имплантированном углеродом

- кремния / Н.П.Баран, А.А.Бугай, Б.Н.Романюк и др. // Укр.физ. журнал. - 1990. - вып.5. - С. 735-737.
43. Litovchenko V.G., Valakh M.Ya., Romanjuk B.N. The role of mechanical fields in heavy implanted systems // Intern.Conf. on ion implantation and ion beam equipment. - Elenite, 1990. - P.28-29.
  44. Литовченко В.Г., Романюк Б.Н., Попов В.Г. Создание малодефектных эпитаксиальных структур со скрытыми диэлектрическими слоями // Тезисы докл. 7 Междунар.конф. "Микроэлектроника-90". - Минск, 1990. - С.45-46.
  45. Litovchenko V.G., Korbutyak D.V., Romanjuk B.N. Getter epitaxy of the thin film structures and their optical properties // 1-st Intern.conf."Epitaxial crystal growth". - Budapest, 1990. - P. 112-114.
  46. Исследование эффекта ионно-лучевого отжига аморфизированных имплантацией приповерхностных слоев по спектрам КРС / В.В.Артамонов, М.Я.Валах, Б.Н.Романюк // Физ. и техн. полупр. - 1990. - т.24, вып.20. - С. 1747-1751.
  47. Epitaxial growth of GaAs films on the silicon substrates after transition layer formation by ion implantation / B.N.Romanjuk, V.G.Litovchenko, V.G.Popov et.al. // Proc. of the 3-rd Europ.conf. on crystal growth. - Budapest, May 5-11. - 1991. - Trans.Tech.Publ. - P.506-514.
  48. Litovchenko V.G., Romanjuk B.N., Kryuchenko Y.V. Micromechanisms of stimulated gettering in semiconductor thin film layered system // Препринт №91 Inst. of Semicond. - Kiev - 1991, 24 P.
  49. Влияние повторного облучения легкими ионами на спектры КРС предварительно аморфизированных имплантацией  $Ag^+$  слоев Si / В.В.Артамонов, М.Я.Валах, Б.Н.Романюк и др. // Укр.физ. журнал. - 1991. - т.36, вып.9. - С. 784-792.
  50. Механизмы преципитации кислорода в структурах кремния-диэлектрик / В.Г.Литовченко, В.Г.Попов, Б.Н.Романюк и др. // Укр.физ. журнал. - 1991. - т.36, вып.9. - С. 1424-1430.
  51. Артамонов В.В., Валах М.Я., Романюк Б.Н. Оптическое зондирование упругих напряжений в кремниевых структурах при планарном геттерировании // Микроэлектроника. - 1990. - т.19, вып.4. - С. 380-386.
  52. Кив А.Е., Герога А.Н., Романюк Б.Н. Перколяционные методы в физике неупорядоченных полупроводников // В сб. научн. трудов

- "Фотозлектроника". - К.: "Льбидь" - 1991. - С. 55-59.
53. Романюк Б.Н., Попов В.Г., Прокофьев А.Ю. Процессы формирования скрытых диэлектрических слоев в Si при имплантации ионов  $N^+$  и  $O^+$  // Укр. физ. журнал. - 1992. - т.37, вып.3. - С. 389-392.
54. Исследование пространственного распределения дефектов и механических напряжений в кремнии, имплантированном ионами углерода / В.В.Артамонов, М.Я.Валах, Б.Н.Романюк и др. // Физ. и техн. полупроводн. - 1991. - т.25, вып.10. - С.1704-1710.
55. А.с. N1738034 СССР. Способ изготовления структур кремний-окисел кремния или нитрид кремния - кремний / В.Г.Литовченко, А.П.Медвидь, Б.Н.Романюк и др. // Заявка N4704981. Приоритет 22.05.1990г. - Выд.01.02.1992г.
56. Litovchenko V.G., Romanyuk B.N., Popov V.G. Stimulated gettering processes in Si-microelectronics // 37 Intern. Wissenschaft. Koll. T.U.- Ilmenau, 21-24.09.1992. - Band 2. - P.134-138.

#### SUMMARY

Work is devoted to investigation of defect creation and gettering processes in Si-based layered structures under conditions of introducing of nonequilibrium concentration of the point defects using ion implantation technique. Processes of amorphization have been studied, the role of mechanical stresses have been found and the model explaining the experimental results have been proposed. The physical bases of the methods of impurity planar gettering coupled with the dynamic process of thin layers formation have been developed. The stimulation role of interstitial defects at gettering process have been established. The parameters of silicon, implanted by oxygen and carbon ions have been investigated. The effect of laser stimulated diffusion of oxygen have been experimentally found. Implanted carbon accelerates the thermodonor formation and creates complexes which possess gettering activity. Mathematical modelling of kinetics of insulating phase formation in Si for high-dose  $O^+$  and  $N^+$  implantation have been carried out. Structures containing buried insulating layers have been fabricated and investigation of them have been performed.

## РЕЗЮМЕ

Работа посвящена исследованиям процессов дефектообразования и геттерирования в слоистых структурах на основе кремния при введении неравновесной концентрации точечных дефектов путем ионной имплантации. Изучены процессы аморфизации и ионно-стимулированного упорядочения Si, обнаружена роль механических напряжений и предложена модель, объясняющая экспериментальные результаты. Развита физическая основа методов планарного геттерирования примесей в сочетании с динамическими процессами получения тонких слоев, установлена стимулирующая роль междоузельных дефектов при геттерировании. Изучены параметры кремния, имплантированного ионами кислорода и углерода. Экспериментально обнаружен эффект лазерно-стимулированной диффузии кислорода. Имплантированный углерод ускоряет образование термодоноров, а также создает комплексы обладающие геттерной активностью. Проведено математическое моделирование кинетики формирования диэлектрической фазы в Si при высокодозовой имплантации  $O^+$  и  $N^+$ . Изготовлены структуры со скрытым диэлектрическим слоем и проведено их изучение.

РОМАНЮК Борис Миколайович

ПРОЦЕСИ ІОННО-СТИМУЛЬОВАНОГО МАСОПЕРЕНОСУ  
І ГЕТЕРУВАННЯ У НАПІВПРОВІДНИВНИХ ПЛАНАРНИХ  
СТРУКТУРАХ

Подписано в печать 20.11.92 г. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсетная 60 гр/м<sup>2</sup>. Офсетная печать. Усл.-печ.листов  
1,75. Уч.-изд. листов 1,3. Тираж 100. Заказ 206. Бесплатно

---

Институт физики АН Украины, ОНПИ  
252028, Киев-28, ГСП, пр.Науки, 46.

469178

078 26.281

**AV 26.281**

БЕСИЛАТНО